



Doctoral Thesis

High-velocity impact of a liquid droplet on a rigid surface the effects of liquid compressibility

Author(s):

Haller Knezevic, Kristian

Publication Date:

2002

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004494719> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 14826

High-Velocity Impact of a Liquid Droplet on a Rigid
Surface: The Effect of Liquid Compressibility

Dissertation

submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

presented by

Kristian Haller Knežević

Dipl. Phys. ETH (M.Sc. Physics)

born on August 28th, 1972

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Dimos Poulikakos, examiner

Prof. Dr. Peter Monkewitz, co-examiner

Zurich, October 2002

Abstract

In this PhD thesis, the compressible fluid dynamics of high-speed impact of a spherical liquid droplet on a rigid substrate is investigated. The impact phenomenon is characterised by the compression of the liquid adjacent to the target surface, whereas the rest of the liquid droplet remains unaware of the impact. Initially, the area of compressed liquid is assumed to be bounded by a shock envelope, which propagates both laterally and upwards into the bulk of the motionless liquid. Utilizing a high-resolution axisymmetric solver for the Euler equations, it is shown that the compressibility of the liquid medium plays a dominant role in the evolution of the phenomenon. Compression of the liquid in a zone defined by a shock wave envelope, lateral jetting of very high velocity and expansion waves in the bulk of the medium are the most important mechanisms identified, simulated and discussed.

During the first phase of impact, all wave propagation velocities are smaller than the contact line velocity, thus the shock wave remains attached to the latter. At a certain point, the radial velocity of the contact line decreases below the shock velocity and the shock wave overtakes the contact line, starting to travel along the droplet free surface. The resulting high pressure difference across the free surface at the contact line region triggers an eruption of intense lateral jetting. The shock wave propagates along the free surface of the droplet and it is reflected into the bulk of the liquid as an expansion wave. The development of pressure and density in the compressed area are numerically calculated using a front tracking method. The exact position of the shock envelope is computed and both onset and magnitude of jetting are determined, showing the emergence of liquid jets of very high velocity (up to 6000 m/s). Computationally obtained jetting times are validated against analytical predictions. Comparisons of computationally obtained jetting inception times with analytic results show that agreement improves signif-

icantly if the radial motion of the liquid in the compressed area is taken into account.

An analytical model of the impact process is also developed and compared to the axisymmetric numerical solution of the inviscid flow equations. Unlike the traditional linear model - which considers all wave propagation velocities to be constant and equal to the speed of sound, the developed model predicts the exact flow state in the compressed region by accommodating the real equation of state. It is shown that the often employed assumption that the compressed area is separated from the liquid bulk by a single shock wave attached to the contact line, breaks down and results in an anomaly. This anomaly emerges substantially prior to the time when the shock wave departs from the contact line, initiating lateral liquid jetting. Due to the lack of more sophisticated mathematical models, this tended to be neglected in most works on high speed droplet impact, even though it is essential for the proper understanding of the pertinent physics. It is proven that the presence of a multiple-wave structure (instead of a single shock wave) at the contact line region resolves the aforementioned anomaly. The occurrence of this more complex multiple wave structure is also supported by the numerical results.

Based on the developed analytical model, a parametric representation of the shock envelope surface is established, showing a substantial improvement with respect to previous linear model, when validated against numerical findings.

In the final part of the thesis, the assumption of a multiple wave structure which removes the above mentioned anomaly is underpinned with an analytical proof showing that such a structure is indeed a physically acceptable solution.

Zusammenfassung

Die Zielsetzung dieser Doktorarbeit war die Erforschung der fluiddynamischen Phänomene, die beim sehr intensiven Tropfenaufschlag auf feste Oberflächen auftreten. Dieser, sogenannter ‘High-Velocity’ Aufprall ist durch eine sehr hohe Kompression der an der Oberfläche angrenzenden Flüssigkeit charakterisiert.

In der ersten Aufschlagphase wird angenommen, daß die Bereiche der komprimierten und ruhenden Flüssigkeit durch eine Schockwelle getrennt sind, die sich sowohl seitlich als auch aufwärts in den ruhenden Tropfenhauptteil fortbewegt. Unter der Verwendung von hochauflösenden axial-symmetrischen Euler-Solver zeigen wir, daß die Liquidkompressibilität eine dominante Rolle in der Zeitevolution des Phänomens spielt. Die Flüssigkeitskompression in der von der Schockwelle und der Wand umspannten Zone, seitliche Jettingeruption sowie Propagation & Wechselwirkung von Schock- und Expansionswellen sind die wichtigsten Mechanismen, die in dieser Arbeit identifiziert, simuliert und besprochen werden.

Da alle Wellengeschwindigkeiten in der ersten Aufprallphase kleiner als die Kontaktliniengeschwindigkeit sind, bleibt die Schockwelle in dieser Phase angefestigt an der Kontaktlinie. Zu einem bestimmten späteren Zeitpunkt fällt die Radialgeschwindigkeit der Kontaktlinie unter die Schockgeschwindigkeit, die Stoßwelle ‘überholt’ die Kontaktlinie und beginnt ihre Fortbewegung entlang der Tröpfchenoberfläche. Der resultierende hohe Druckunterschied an der freien Oberfläche (im Kontaktlinienbereich) löst eine gewaltige seitliche Jeteruption aus. Die Stoßwelle pflanzt sich entlang der freien Tröpfchenoberfläche weiter fort und wird dabei als die Expansionswelle reflektiert. Die Druck- und Dichteentwicklung im komprimierten Gebiet werden numerisch mittels einer ‘Front Tracking’ Methode errechnet. Die genaue Position des Schock-Envelopes sowie

das zeitliche Auftreten vom Jetting werden untersucht und ermittelt. Der Moment der Jettingeruption, sowie seine Intensität (Geschwindigkeiten bis zu 6000 m/s) werden ebenfalls identifiziert. Rechnerisch erhaltene Jetting-Zeiten werden anschließend gegen die analytische Vorhersagen validiert. Die Vergleiche zeigen, daß sich die Modellübereinstimmungen erheblich verbessern, wenn die Radialbewegung der Flüssigkeit im komprimierten Bereich in Betracht gezogen wird.

Ein analytisches Aufschlagmodell wurde ebenfalls entwickelt und anschließend mit der numerischen Lösungen der nicht-viskosen Flußgleichungen verglichen. Im Gegensatz zum traditionellen Linearmodell - das alle Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten der konstanten Schallgeschwindigkeit gleichsetzt, sagt das entwickelte Modell den genauen Flußzustand in der komprimierten Region voraus. Dies wurde dadurch ermöglicht, daß die reale Zustandgleichung des Liquides in das Modell miteinbezogen wurde. Wie wir zeigen, führt die häufig verwendete Annahme, daß der komprimierte- vom ruhenden Tropfenbereich durch eine einzelne Stoßwelle getrennt ist, zwingend zu einer tiefen physikalischen Inkonsistenz.

Diese Anomalie taucht auf wesentlich bevor die Stoßwelle von der Kontaktlinie abreissen und somit die Jeteruption hervorrufen kann. Mangels besseren mathematischen Modellen, wurde diese Anomalie in den meisten Arbeiten über Tropfenaufschlag vernachlässigt, auch wenn Ihre Lösung für das genaue Phänomenverständnis unerläßlich ist. Es wird bewiesen, daß das Vorhandensein einer multiplen Wellenstruktur (im Gegensatz zu einer einzelnen Schockwelle) an den Kontaktlinie die vorher erwähnte Anomalie behebt. Das Auftreten dieser komplizierteren mehrfachen Wellenstruktur wird auch durch die numerischen Resultate bestätigt. Basierend auf dem entwickelten analytischen Modell wird schließlich eine parametrische Darstellung der Schockwellenvelops hergeleitet. Der Vergleich mit den numerischen Befunden zeigt eine erhebliche Verbesserung in Bezug auf früheres lineares Modell.